

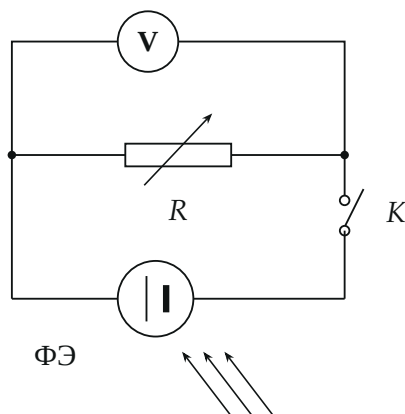
Фотоэлемент

Задача 1. [Республиканская олимпиада (Беларусь) 2025/26, 11 класс, экспериментальный тур, задача 2]

Приборы и оборудование: солнечный фотоэлемент, фонарик, мультиметр, переменный резистор 22 кОм, переменный резистор 5,0 кОм, ключ, соединительные провода, картонная папка, пластилин.

В данном задании вам необходимо исследовать свойства солнечного фотоэлемента как источника электрической энергии. В качестве Солнца используйте фонарик. Чтобы избежать излишней разрядки батареек фонарика, включайте его только во время проведения измерений. Фонарик и фотоэлемент закрепляйте на столе с помощью пластилина. Следите, чтобы панель фотоэлемента всё время была полностью освещена светом фонарика. Если во время измерений изменится взаимное положение фонарика и солнечного элемента — измерения придётся проводить сначала. Во время проведения измерений фонарик и фотоэлемент закрывайте от внешнего света картонной папкой.

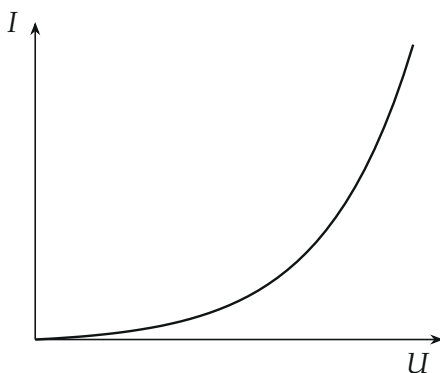
Для проведения измерений используйте электрическую цепь, схема которой показана на рисунке. С помощью этой цепи Вы можете измерять как сопротивление переменного резистора (для этого мультиметр переключить в режим омметра), так и напряжение на нём (переключив мультиметр в режим вольтметра). Правильно выбирайте диапазоны измерений.



Немного о фотоэлементе.

Основная часть фотоэлемента — два слоя полупроводников p -типа и n -типа (так называемый p – n переход). Под действием света происходит разделение носителей зарядов в этих слоях, в результате чего возникает ЭДС.

Электрические свойства фотоэлемента подобны свойствам обычного полупроводникового диода. В частности, сила тока через диод нелинейно зависит от напряжения на нём, как схематически показано на рисунке (при небольших токах).



При обратном подключении сила тока через диод практически равна нулю.

Непосредственно Вы можете измерять сопротивление переменного резистора R и соответствующее напряжение на нём U . Для анализа работы Вам предстоит рассчитывать силы токов и мощности, выделяющиеся на переменных резисторах.

1. Запишите формулы, позволяющие по измеренным значениям сопротивления резистора R и напряжения на нём U рассчитывать силу тока в цепи I и мощность, выделяющуюся на резисторах.

Все измерения необходимо провести при двух значениях расстояния между фотоэлементом и фонариком. Для имитации дневного освещения фонарик расположите на расстоянии нескольких сантиметров от фотоэлемента. При этом напряжение на резисторе при его максимальном сопротивлении (примерно 22 кОм) должно быть не меньше 1,9 В.

Для проведения «вечерних» измерений отодвиньте фонарик, так чтобы напряжение на резисторе (опять 22 кОм) лежало в диапазоне 1,3–1,5 В.

Используйте максимальный диапазон изменения сопротивления (используйте оба переменных резистора). В таблице результатов укажите, какие резисторы Вы использовали для проведения измерений. Обозначьте: 1 — использован резистор 22 кОм; 2 — использован резистор 5,0 кОм; 3 — использованы оба резистора (последовательно).

Рекомендуем сначала провести все измерения «днём», а потом все измерения «вечером».

2. Проведите в максимально широком диапазоне измерения зависимости напряжения на резисторе от его сопротивления $U(R)$.

3. Для каждого измерения рассчитайте значения силы тока I и мощности на резисторе P . Результаты занесите в таблицу. Используйте указанные в таблице единицы измерения.

4. На одном бланке постройте нагрузочные характеристики фотоэлемента — зависимость напряжения на резисторе от силы тока через него $U(I)$.

5. Дайте качественное объяснение полученным зависимостям: почему при малых токах напряжение слабо зависит от силы тока. Дайте качественное объяснение зависимостей при малых сопротивлениях. Можете предложить примитивную модель работы фотоэлемента — несколько формул не помешают.

6. Постройте графики зависимости мощности P от сопротивления нагрузки R .

7. Укажите, при каких сопротивлениях достигается максимальная мощность. Кратко объясните, почему эти значения различаются «днём» и «вечером».

▲ **Решение. Что происходит.** Освещённый фотоэлемент — не батарейка с постоянной ЭДС, а источник, у которого сила тока почти постоянна, пока напряжение мало, а затем быстро падает: избыток тока уходит через p – n переход, который работает как диод. Поэтому нагрузочная характеристика $U(I)$ состоит из почти вертикального участка (малые R) и почти горизонтального (большие R) с изгибом между ними. Мощность

на нагрузке максимальна у изгиба. Главная идея: свет задаёт ток $I_{\text{ф}}$, а диод — форму изгиба; при уменьшении освещённости изгиб сдвигается к большим сопротивлениям.

Обозначения. R — сопротивление резистора (омметр), U — напряжение на нём (вольтметр), I — сила тока в цепи, P — мощность на резисторе. Данных измерений в условии нет: опыт ставит сам ученик, ниже обработка показана на данных примера организаторов, то есть числа — пример, ход и формулы — общие.

1. Резистор и фотоэлемент соединены последовательно через ключ, вольтметр подключён параллельно резистору. Входное сопротивление мультиметра в режиме вольтметра (порядка мегаом) во много раз больше $R \leq 27$ кОм, поэтому ток вольтметра можно не учитывать, и весь ток цепи идёт через резистор. По закону Ома для участка цепи и по формуле мощности

$$I = \frac{U}{R}, \quad P = UI = \frac{U^2}{R}.$$

В выбранных единицах: $I [\text{мкА}] = 1000 U [\text{В}]/R [\text{кОм}]$, $P [\text{мкВт}] = U [\text{В}] \cdot I [\text{мкА}]$. Например, $U = 1,990$ В, $R = 20,60$ кОм: $I = 96,6$ мкА, $P = 192,2$ мкВт.

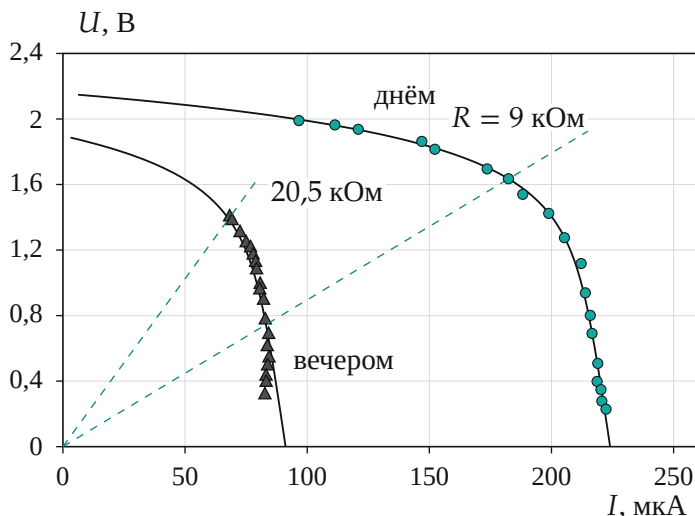
Обратите внимание. Сопротивление резистора измеряют омметром при разомкнутом ключе: омметр подаёт свой маленький ток, и при подключённом фотоэлементе он покажет не сопротивление резистора. Напряжение измеряют при замкнутом ключе, не меняя положения ручки после измерения R .

2–3. Таблица измерений и расчётов (в столбцах № — способ включения резисторов: 1, 2 или 3 из условия). Для каждого измерения I и P вычислены по формулам п. 1. В таблице организаторов строки после 18-й в столбце «днём» повторяют начало таблицы, а часть строк «вечером» набрана дважды; здесь оставлены только различные измерения.

днём				
№	U_0 , В	R , кОм	I , мкА	P , мкВт
1	1,990	20,60	96,6	192,2
1	1,964	17,64	111,3	218,7
1	1,937	16,02	120,9	234,2
1	1,863	12,68	146,9	273,7
1	1,815	11,92	152,3	276,4
1	1,695	9,76	173,7	294,4
1	1,540	8,18	188,3	289,9
1	1,424	7,16	198,9	283,2
1	1,275	6,21	205,3	261,8
1	1,118	5,27	212,1	237,2
1	0,939	4,39	213,9	200,8
1	0,801	3,71	215,9	172,9
1	0,691	3,19	216,6	149,7
2	0,508	2,32	219,0	111,2
2	0,398	1,82	218,7	87,0
2	0,348	1,58	220,3	76,6
2	0,278	1,26	220,6	61,3
2	0,229	1,03	222,3	50,9

вечером				
№	U_0 , В	R , кОм	I , мкА	P , мкВт
1	1,406	20,60	68,3	96,0
1	1,383	19,97	69,3	95,8
1	1,310	18,07	72,5	95,0
1	1,248	16,64	75,0	93,6
1	1,217	15,84	76,8	93,5
1	1,173	15,06	77,9	91,4
1	1,128	14,30	78,9	89,0
1	1,083	13,66	79,3	85,9
1	0,994	12,31	80,7	80,3
1	0,960	11,91	80,6	77,4
1	0,897	10,92	82,1	73,7
1	0,777	9,38	82,8	64,4
1	0,688	8,17	84,2	57,9
1	0,614	7,34	83,7	51,4
1	0,545	6,46	84,4	46,0
1	0,496	5,92	83,8	41,6
2	0,434	5,22	83,1	36,1
2	0,396	4,76	83,2	32,9
2	0,320	3,87	82,7	26,5

4. Нагрузочные характеристики — точки (I, U) из таблицы, на одном рисунке для двух освещённостей. Линии — расчёт по модели из п. 5.



Нагрузочные характеристики: кружки — «днём», треугольники — «вечером», линии — модель п. 5. Штриховые прямые $U = RI$ проходят через точки максимальной мощности.

5. Качественно. Часть напряжения фотоэлемента «съедает» его собственное внутреннее сопротивление. Определим его как $r(I) = (\varepsilon - U)/I$, где ε — напряжение разомкнутой цепи. Из рисунка видно, что r не постоянно и уменьшается с ростом тока: если $r \approx a/I$, то

$$U = \varepsilon - Ir \approx \varepsilon - a,$$

то есть напряжение при малых токах почти не зависит от силы тока: пока R велико, фотоэлемент держит почти постоянное напряжение. При малых R напряжение на нагрузке мало, p – n переход почти закрыт, и сила тока перестаёт зависеть от R : $I \approx I_\phi$ — ток, который создаёт свет. Тогда фотоэлемент — источник тока, $U = IR$ растёт пропорционально R .

Модель. Заменяем фотоэлемент источником тока I_ϕ (он пропорционален освещённости), параллельно которому включены диод и сопротивление утечки $R_{\text{ш}}$ (рисунок ниже). Ток нагрузки равен фототоку минус

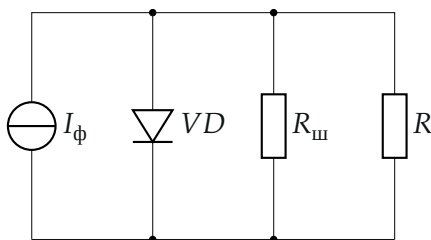
токи диода и утечки:

$$I = I_{\phi} - I_s (e^{U/U_T} - 1) - \frac{U}{R_{\text{ш}}}.$$

Здесь I_s — обратный ток насыщения диода, U_T — характерное напряжение p – n перехода (у панели из нескольких последовательных элементов оно в несколько раз больше kT/e). Решение относительно напряжения при $I < I_{\phi}$ даёт

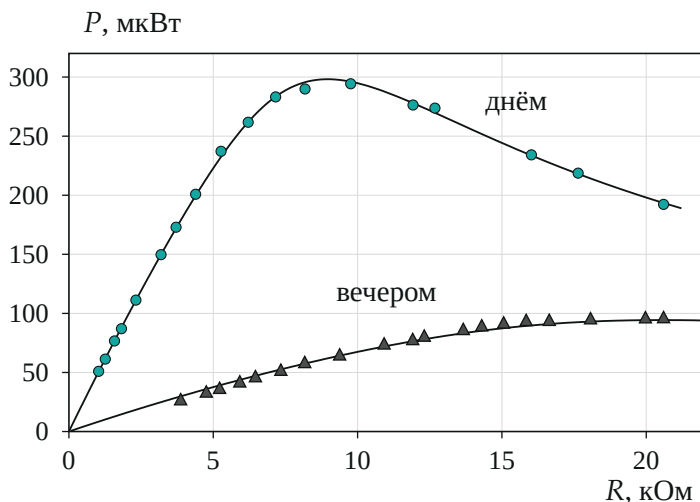
$$U \approx U_T \ln \frac{I_{\phi} - I}{I_s},$$

то есть логарифм: ток меняется на десятки процентов, а напряжение — на доли U_T . Это и есть слабая зависимость при малых токах. При $U \ll U_T$ экспонента близка к единице, диодный ток мал и $I \approx I_{\phi} - U/R_{\text{ш}}$ — практически постоянный ток. Подбор по точкам «днём» даёт $I_{\phi} \approx 224$ мкА, $U_T \approx 0,25$ В, $I_s \approx 0,04$ мкА, $R_{\text{ш}} \approx 100$ кОм. Остальные точки «вечером» описываются теми же U_T , I_s , $R_{\text{ш}}$ и одним новым параметром $I_{\phi} \approx 91$ мкА (меньше света — меньше фототок); среднее отклонение расчёта от опыта около 2 мкА.



Модель фотозлемента: источник тока I_{ϕ} , диод VD и сопротивление утечки $R_{\text{ш}}$ параллельно; справа — нагрузка R .

6. Графики $P(R)$ — по значениям из таблицы (линии — та же модель).



Мощность на резисторе: «днём» максимум острый, «вечером» — пологий и сдвинут к большим сопротивлениям.

7. «Днём» максимум мощности $P \approx 294$ мкВт приходится на $R \approx 10$ кОм (в примере — точка $R = 9,76$ кОм; расчёт по модели — $9,0$ кОм, 298 мкВт). «Вечером» мощность растёт вплоть до конца диапазона и почти не меняется на участке $18\text{--}20,6$ кОм ($95\text{--}96$ мкВт); максимум — около $18\text{--}20$ кОм (расчёт — $20,5$ кОм, 94 мкВт).

Почему так. Мощность $P = UI$ максимальна, когда $dP/dI = U + I dU/dI = 0$, то есть

$$R = \frac{U}{I} = -\frac{dU}{dI} = r_d.$$

Сопротивление нагрузки должно равняться дифференциальному внутреннему сопротивлению элемента $r_d = -dU/dI$ — наклону нагрузочной характеристики (для источника с постоянными ε и r это обычное условие $R = r$). Штриховые прямые $U = RI$ на рисунке к п. 4 проходят через точки изгиба: их наклоны 9 и $20,5$ кОм. У изгиба dI/dU пропорционально $I_\phi - I$, то есть доле фототока, поэтому $r_d \sim U_T/I_\phi$, и при ослаблении света фототок падает, а r_d растёт обратно пропорционально I_ϕ . Отношение фототоков $224/91 \approx 2,5$, и сопротивление нагрузки в максимуме выросло примерно в $2,3$ раза: с 9 до 20 кОм.

Проверка. Размерность: В/кОм = мА, поэтому в таблице множитель

1000 для мкА; $V \cdot \text{мкА} = \text{мкВт}$. Предельные случаи: при $R \rightarrow \infty$ ток $I \rightarrow 0$, $U \rightarrow \varepsilon \approx 2,2 \text{ В}$ («днём»), при $R \rightarrow 0$ напряжение $U \rightarrow 0$, $I \rightarrow I_\phi$: в обоих пределах $P \rightarrow 0$, значит, максимум лежит между ними, как на графике. Второй способ: независимое условие $R = -dU/dI$ по модели даёт 8,8 кОм («днём») против 9,0 кОм прямого перебора и 9–10 кОм в опыте. Фактор заполнения $P_{\max}/(\varepsilon I_\phi) = 298/(2,2 \cdot 224) \approx 0,6$ — типичное значение для солнечного элемента (доля прямоугольника $\varepsilon \times I_\phi$, которую занимает точка максимальной мощности).

Ответ. 1) $I = U/R$, $P = UI = U^2/R$ (I в мкА = $1000 U/R$ при U в В, R в кОм); 4) нагрузочные характеристики — рисунок, «днём» $U_{\text{хх}} \approx 2,2 \text{ В}$, $I_{\text{кз}} \approx 224 \text{ мкА}$, «вечером» $\approx 1,9 \text{ В}$ и $\approx 91 \text{ мкА}$; 5) $I = I_\phi - I_s(e^{U/U_T} - 1) - U/R_{\text{ш}}$, при больших R $U \approx U_T \ln \frac{I_\phi - I}{I_s}$ меняется слабо, при малых R $I \approx I_\phi$; 6) графики $P(R)$ — рисунок; 7) максимальная мощность «днём» при $R \approx 10 \text{ кОм}$ ($\approx 294 \text{ мкВт}$), «вечером» при $R \approx 18\text{--}20 \text{ кОм}$ ($\approx 96 \text{ мкВт}$): максимум при $R = -dU/dI$, а при ослаблении света фототок падает и это сопротивление растёт.